

# MFC 작동기를 이용한 Hull 구조물의 진동 저감

## Vibration Suppression of Hull Structure Using MFC Actuators

손 정 우\* · 김 흥 수\*\* · 최 승 북†

Jung Woo Sohn, Heung Soo Kim and Seung-Bok Choi

(2007년 3월 28일 접수 ; 2007년 6월 18일 심사완료)

**Key Words** : Piezoelectric Composite Actuator(압전 복합재 작동기), Smart Hull Structure(지능형 헬 구조물), Finite Element Modeling(유한요소 모델링), Modal Analysis(모드 해석), Vibration Suppression(진동 저감)

### ABSTRACT

Performance evaluation of advanced piezoelectric composite actuator is conducted with its application of structural vibration control. Characteristics of MFC(macro fiber composite) actuator are investigated by comparing traditional piezoceramic patch actuator. Finite element modeling is used to obtain equations of motion and boundary effects of smart hull structure with MFC actuator. Dynamic characteristics of the smart hull structure are studied through modal analysis and experimental investigation. LQG control algorithm is employed to investigate active damping of hull structure. It is observed that vibration of hull structure is suppressed effectively by the MFC actuators.

### 1. 서 론

기계 구조물이 생명체와 같이 외부의 환경 변화를 감지하고 이에 능동적으로 반응하여 구조물의 안정성 및 신뢰성을 확보할 수 있는 지능 구조물에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>(1,2)</sup>. 지능 구조물에 쓰이는 지능 재료에는 온도 조절에 의해 기억된 형상이 제어될 수 있는 형상기억합금(shape memory alloy), 전기장과 자기장에 의해 유변학적 성질이 제어될 수 있는 ER(electro-rheological) 및 MR(magneto-rheological) 유체 등이 있으며, 특히 기계적 변형에 의해 전기적 신호가 발생하고, 전압 인가에 따라 기계적 변형이 발생하는 압전 재료(piezoelectric material)는 감지기의 특성과 작동기

의 특성을 모두 가지고 있기 때문에, 이를 이용한 많은 연구가 진행되어 오고 있다<sup>(3)</sup>. 압전 재료를 이용한 작동기는 기본적으로 작동 변형률에 의해 구동되며, Crawley와 de Luis 등은 지능형 보 구조물에 대한 모델링 방법의 연구로 이 분야에 선구적인 업적을 남겼다<sup>(4)</sup>. 그 후로 이러한 작동 방법을 이용한 지능 구조물에 대한 연구가 국내외에서 활발하게 이루어져 왔으나, 빔 또는 평판 형태의 단순한 구조물에 대한 연구가 주를 이루고 있다<sup>(5-8)</sup>. 최근에는 실린더형 셸 구조물 등의 복잡한 구조물에 압전 재료를 감지기와 작동기로 적용하는 연구가 다양하게 진행되고 있다<sup>(9,10)</sup>.

압전 재료는 단위 면적당 발생력이 우수하여 제품을 작게 만들어야 하는 항공, 우주, 군사 분야에서 폭넓게 응용되고 있으며, 높은 정밀도와 빠른 반응 속도를 바탕으로 초정밀 위치제어 등에 응용되고 있다. 압전 현상은 1880년 큐리 형제가 크리스탈 변형 시 전하가 발생한다는 것에서 처음 발견을 했으며, 압력과 전기란 그리스어에서 합성되었다. 수정, 황

† 교신저자 : 정회원, 인하대학교 기계공학부  
E-mail : seungbok@inha.ac.kr  
Tel : (032) 860-7319, Fax : (032) 868-1716  
\* 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 정회원, 인하대학교 기계공학부

옥, 로셀 소금 등 자연 상태의 압전 재료는 그 효과가 크지 않아 실용화되지 못하다가 압전 효과가 큰 재료가 인공적으로 합성된 후에야 공학적인 응용이 가능해졌다. 폴리머 계통의 압전 재료는 1969년 일본의 가와이에 의해 개발된 PVDF(polyvinylidene fluoride)가 대표적이며, 유연성이 있고 가벼우며 음향 임피던스가 낮은 장점이 있으나, 사용온도가 비교적 낮고, 힘 발생이 작으며, 전자기에 민감한 단점이 있다. 납, 지르코늄, 산화티타늄의 혼합물인 PZT는 가장 대표적인 압전 세라믹으로 전기적 결합성이 매우 좋고 전기적인 안정성과 사용온도가 높은 장점이 있어 많이 사용되고 있으나, 작동 범위가 작고, 취성이 크다는 단점이 있다. 대변형을 발생시키기 힘든 단점을 극복하기 위하여 여러 가지 형태의 압전 작동기가 개발되었다. 바이모프 작동기는 두 개의 압전 세라믹의 폴링 방향을 반대로 배열한 것으로 압전 세라믹의 인장-압축으로부터 큰 굽힘을 유발할 수 있으나, 작동력이 작은 단점이 있다. 적층형 압전 작동기는 여러 개의 PZT를 배열하여 일체로 제작한 것으로 적층수 만큼 변위가 증가하고 큰 작동력을 얻을 수 있으나, 전기용량이 커지는 단점이 있다. RAINBOW(reduced and internally biased oxide wafer) 작동기는 화학적인 반응을 통하여 PZT의 한쪽 면을 환원시켜 곡률을 가지게 되고, 큰 작동 변위를 얻을 수 있다. NASA에서 개발되어 상용화된 THUNDER<sup>TM</sup>(thin layer unimorph driver)작동기는 금속 재료와 압전 박판의 열팽창 계수의 차이로 말미암아 곡률을 가지게 되고, 큰 변위를 유발하게 된다. 압전 세라믹의 깨어지기 쉽고, 곡면 형상의 구조물에는 사용이 제한되는 단점을 극복하기 위해 압전 세라믹 파이버를 이용한 복합재 형태의 압전 작동기의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 미국 MIT 대학의 Hagood 교수팀이 압전 세라믹

파이버를 바탕으로 한 AFC(active fiber composite)를 개발하여 헬리콥터 블레이드의 비틀림을 제어하였다<sup>(11,12)</sup>. AFC는 기존의 재료들 보다 강도가 우수하고, 곡면 형상의 구조물에 부착이 용이하며, 작동력이 크고 이방성 구동이 가능하다. AFC는 압전 세라믹 파이버와 폴리머를 경화시켜 만들 수 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 폴리머 매트릭스와 압전섬유로 이루어진 낱장의 AFC 표면에 전극을 손가락 깎지 낀 모양으로 파이버와 수직하게 배열하면 파이버의 축방향으로 전기장이 발생하여 기존의 압전 작동기보다 더 큰 작동력을 얻게 된다. 이러한 AFC를 적층하게 되면 적층각에 따라 비틀림 모멘트를 발생시킬 수 있다. 최근에는 NASA Langley 연구소에서 MFC(macro fiber composite) 작동기를 개발하였고, Smart Materials 사에서 이를 상용화 하였다<sup>(13-15)</sup>. MFC작동기는 압전 세라믹 파이버를 기초로 하여 유연하고, 곡면 형상의 구조물에 응용이 용이한 장점이 있으며,  $d_{33}$  압전 상수를 사용하여 큰 작동 효율을 낼 수 있고, 이방성 구동이 가능하다. Sonado 등은 MFC 작동기를 구조물의 진동 제어와 health monitoring에 적용하기 위한 연구를 수행하였다<sup>(16)</sup>. 손정우 등은 MFC 작동기를 hull 구조물에 적용하여 구조물의 비공진 영역에서의 강제진동에 대한 제어 가능성을 확인하였다<sup>(17)</sup>.

이 연구에서는 복합재 형태의 압전 작동기의 하나인 MFC 작동기의 특성을 파악하고, 이를 적용하여 구조물의 진동 저감 효과를 확인하였다. MFC 작동기의 유한요소 모델링을 위하여 등가 모델을 제안하고, 자유 변형을 해석을 통하여 제안된 등가 모델의 타당성을 검증하였다. 압전 복합재 작동기 MFC와 기존의 압전 세라믹(PZT)을 빔 구조물과 평판 구조물에 적용하여 성능을 비교하였다. 지능형 hull 구조물에 MFC 작동기를 적용하여 작동기의 진동 저감 성능을 평가하였다. 유한요소 모델링을 통하여 MFC 작동기가 부착된 구조물의 동적 특성을 파악하고, 모드 특성 실험을 통하여 결과를 검증하였다. LQG 제어 알고리즘을 적용하여, 구조물의 진동을 효과적으로 저감시킬 수 있음을 확인하였다.

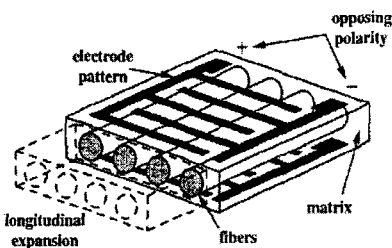


Fig. 1 Schematic diagram of active fiber composite<sup>(2)</sup>

## 2. MFC 작동기

이 연구에서 사용된 MFC 작동기는 Fig. 2에 나타

난 바와 같이 압전 세라믹 파이버와 맞물림 전극으로 구성되어 있으며, 파이버와 파이버 사이, 파이버와 전극 사이에 에폭시를 사용하여 파이버를 보호할 수 있도록 하였다. MFC 작동기의 가장 큰 특징은 Fig. 2에서와 같이 맞물림 전극을 적용하여, 면내 방향으로  $d_{33}$  압전 상수를 사용한 큰 작동력을 발생시킬 수 있다는 것이다. 이는 기존의 압전 세라믹 패치가 상대적으로 작은 값을 가지는  $d_{31}$  압전 상수를 사용하여 면내 방향의 작동력을 발생시키는 것을 보완할 수 있는 장점을 가진다. 전기장 인가 시 단일

압전 파이버에 발생되는 전기장의 분포는 Fig. 3과 같다. (+)극과 (-)극이 교차하는 맞물림 전극을 사용함으로써 일정한 패턴의 전기장 분포가 발생하는 것을 확인할 수 있다. MFC 작동기의 유한요소 모델을 구성하는 것은 각각의 파이버와 전극을 모델링하므로 많은 시간적 비용을 필요로 하게 된다. 따라서 이 연구에서는 Fig. 4와 같이 작동기의 성능을 정확하게 예측하면서, 간단한 형태를 가지는 등가 전기장 모델을 적용하였다<sup>(15)</sup>. Fig. 4(b)에 나타난 것과 같이 등가 전기장 모델은 압전 세라믹 파이버 층을

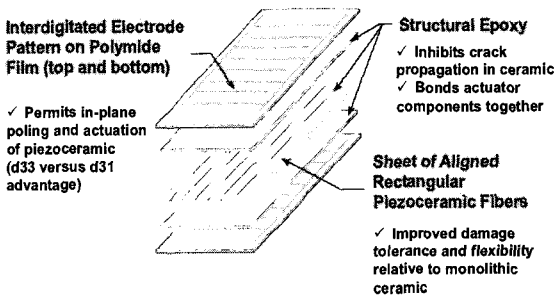


Fig. 2 Schematic diagram of macro fiber composite<sup>(12)</sup>

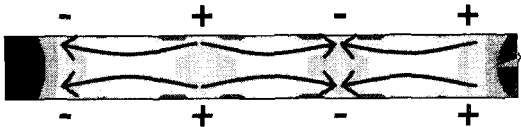


Fig. 3 Electric field distribution for interdigitated electrode

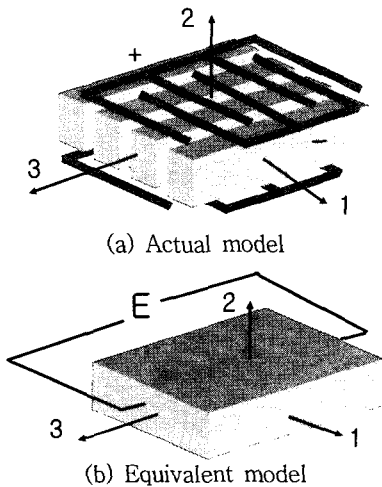


Fig. 4 Equivalent MFC interdigitated electrode model

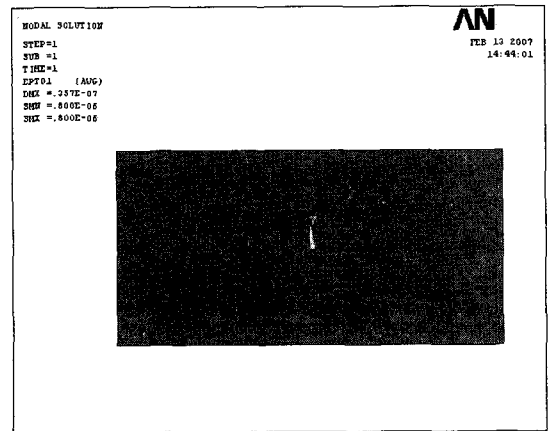


Fig. 5 Free-strain of MFC actuator

Table 1 Material properties of the MFC, PZT and Aluminum [poling direction : 3, ( ) calculated values]

MFC			
$C_{11}^E$	(1.95e10 N/m <sup>2</sup> )	$C_{33}^E$	(4.13e10 N/m <sup>2</sup> )
$C_{44}^E$	(0.55e10 N/m <sup>2</sup> )	CE66	(0.60e10 N/m <sup>2</sup> )
$\epsilon_{11}^S/\epsilon_0$	916 C/m <sup>2</sup>	$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	830 C/m <sup>2</sup>
$d_{31}$	-2100e-10 C/N	$d_{33}$	4600e-10 C/N
$\rho$	7750 kg/m <sup>3</sup>		
PZT 5H			
$C_{11}^E$	12.6e10 N/m <sup>2</sup>	$C_{33}^E$	11.7e10 N/m <sup>2</sup>
$C_{44}^E$	2.3e10 N/m <sup>2</sup>	$C_{66}^E$	2.35e10 N/m <sup>2</sup>
$\epsilon_{11}^S/\epsilon_0$	1700 C/m <sup>2</sup>	$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	1470 C/m <sup>2</sup>
$d_{31}$	-274e-10 C/N	$d_{33}$	593e-10 C/N
$\rho$	7500 kg/m <sup>3</sup>		
Aluminum			
$E$	6.8e10 N/m <sup>2</sup>	$\rho$	2698 kg/m <sup>3</sup>
$\nu$	0.32		

하나의 세라믹 패치형태로 고려하고, 파이버 길이 방향(3방향)으로 일정한 전기장이 형성된다고 가정하였다. 제안된 등가 모델의 타당성 확인을 위하여 상용 해석 소프트웨어 ANSYS를 사용하여 자유 변형률을 확인하였다. 자유 변형률은 작동기에 특별한 구속이 없는 경우에 나타나는 변형률로서 Fig. 5에 보는 바와 같이 균일한 분포를 가지며, 0.8mstrain/V의 값을 가진다. 이는 제조사(Smart-Material)에서 제

시한 0.75~0.9mstrain/V 범위 내에 있으므로, 제안된 등가 전기장 모델이 MFC 작동 변형률을 잘 예측함을 확인할 수 있다. 제안된 등가 모델을 적용하여 기존의 PZT와 MFC 작동기의 성능을 간단하게 비교하였다. 먼저 Fig. 6과 같이 한 쪽 끝이 고정된 알루미늄 빔 구조물에 PZT와 MFC 작동기를 부착하고 단위 전기장을 인가할 때의 변형량을 관찰하였다. 알루미늄 빔과 압전 작동기는 완벽한 접촉으로 가정하였다. 알루미늄 빔과 PZT, MFC의 물성치는 Table 1에 나타내었다. MFC 작동기의 강성계수행렬 값은 제조사에서 제공된 탄성 계수와 피아송 비로부터 계산되어 유한요소 해석에 사용된 값이다. Fig. 7의 ANSYS를 이용한 해석 결과에서 보듯이 MFC 작동기의 경우 빔의 끝단에서의 변위가 3.62mm 발생하였으나, PZT의 경우 2.51mm가 발생하여, 같은 조건에서 MFC 작동기가 더 큰 작동력을 발생시킴

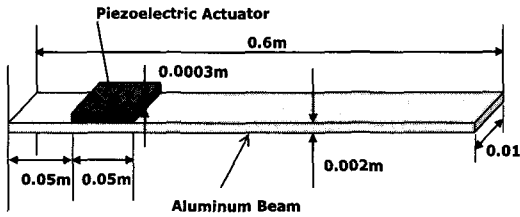
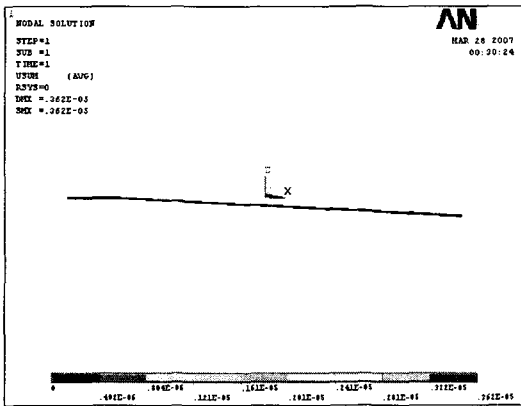
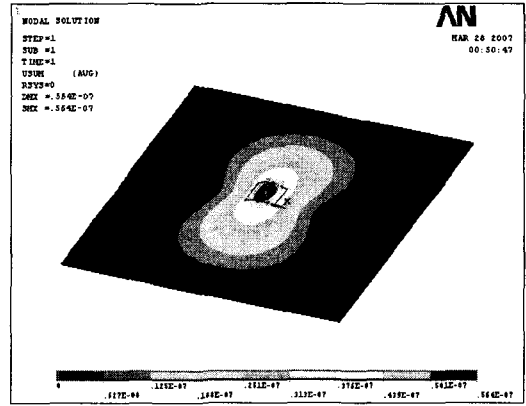


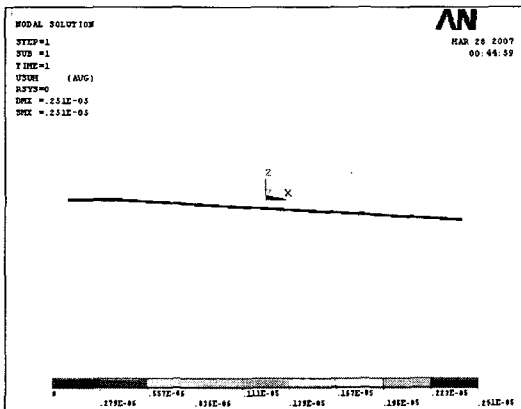
Fig. 6 Schematic diagram of piezoelectric beam



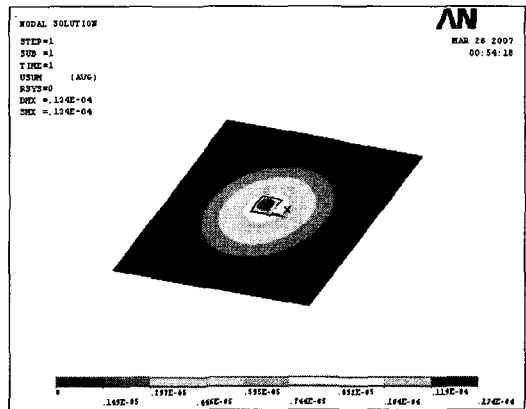
(a) MFC



(a) PZT



(b) MFC



(b) PZT

Fig. 7 Deformation of piezoelectric beam

Fig. 8 Deformation of piezoelectric plate

을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 8과 같이 MFC 작동기를 평판 구조물에 적용하면 작동기가 방향에 따라 다른 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다.

### 3. 구조물 진동 저감

MFC 작동기를 이용한 구조물의 진동 저감 위하여 Fig. 9와 같이 스마트 hull 구조물을 고려하였다. 제안된 구조물은 공기 중에서 자유경계조건을 가진다고 가정하였다. MFC 작동기는 hull 구조물의 길이 방향의 중간에 위치하며 원주 방향으로는 같은 간격으로 3개가 부착되었다. Hull 구조물과 MFC 작동기는 완벽한 결합을 가진다고 가정하였으며, 사용된 알루미늄과 MFC 작동기의 재료 특성은 Table 1에 나타내었다. 구조물과 작동기의 기하학적 특징은 Fig. 10에 나타내었다.

스마트 hull 구조물의 기하학적 구조와 경계 조건의 모델링을 위해서 유한요소 모델링을 수행하였다. 변

분법과 유한요소 이산법을 적용한 후, 연성된 유한요소 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{\phi u} & \mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_u \\ \mathbf{F}_\phi \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{u}$  는 노드 변위,  $\phi$  는 전기적 포텐셜 벡터이다.  $\mathbf{M}$  은 구조체의 질량행렬,  $\mathbf{C}$  행렬은 댐핑행렬,  $\mathbf{K}_{uu}$  는 강성행렬을 나타낸다.  $\mathbf{K}_{u\phi}$  와  $\mathbf{K}_{\phi u}$  는 압전-기계 연성에 의한 연성 강성행렬이다. 이 행렬은 입력 전압이나 기계적 변형에 의해 발생하는 전기적 신호에 따라 압전 재료가 작동기나 감지기로 사용되게 한다.  $\mathbf{K}_{\phi\phi}$  는 전기장에 의한 강성 행렬이다. 댐핑행렬  $\mathbf{C}$  는 질량과 강성에 비례하는 값으로 정의를 하였다. 벡터  $\mathbf{F}_u$  는 기계적인 힘 벡터이고,  $\mathbf{F}_\phi$  는 전기장의 힘 벡터이다. 운동방정식은 노드 변위만을 사용하여 축소 모델 형태로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (2)$$

여기서

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_{uu} - \mathbf{K}_{u\phi}\mathbf{K}_{\phi\phi}^{-1}\mathbf{K}_{\phi u}, \mathbf{F} = \mathbf{F}_u - \mathbf{K}_{u\phi}\mathbf{K}_{\phi\phi}^{-1}\mathbf{F}_\phi \quad (3)$$

이다. 식 (2)와 같이 축소된 운동방정식은 각각의 노드 변위가 서로 연성되어 있다. 하지만, 효율적인 재어를 설계하기 위해서는 비연성 운동방정식이 필요한데, 이를 위해 먼저 모드 해석을 수행하고, 얻어진 모달 행렬을 사용하여 전역 변위 벡터  $\mathbf{u}$  를 모달 변위 벡터  $\boldsymbol{\eta}$  로 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\eta} \quad (4)$$

식 (4)를 식 (2)에 대입하고, 모달 축소를 하게 되면, 되먹임 제어 시스템을 위한 비연성된 운동방정식이 다음과 같이 얻어지게 된다.

$$\hat{\mathbf{M}}\ddot{\boldsymbol{\eta}} + \hat{\mathbf{C}}\dot{\boldsymbol{\eta}} + \hat{\mathbf{K}}\boldsymbol{\eta} = \hat{\mathbf{F}}_u - \hat{\mathbf{F}}_\phi \quad (5)$$

여기서

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{M}} &= \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\Phi}, \hat{\mathbf{C}} = \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\Phi}, \hat{\mathbf{K}} = \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\Phi}, \\ \hat{\mathbf{F}}_u &= \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{F}_u, \hat{\mathbf{F}}_\phi = \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{K}_{u\phi} \mathbf{K}_{\phi\phi}^{-1} \mathbf{F}_\phi \end{aligned} \quad (6)$$

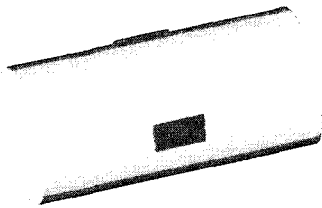


Fig. 9 Schematic of the end-capped hull structure with surface bonded MFC actuators

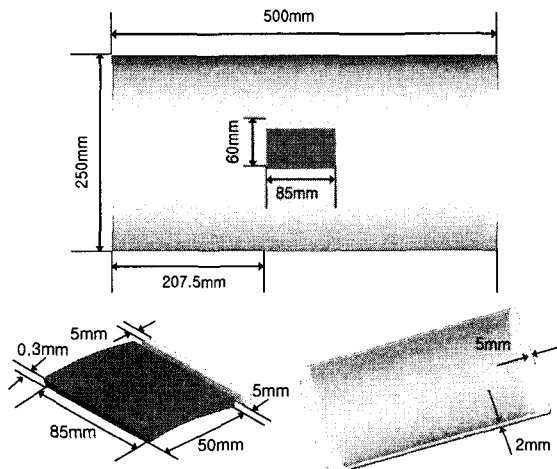
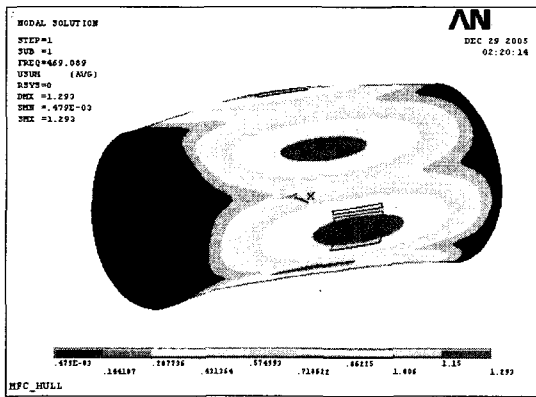


Fig. 10 Geometry of the end-capped hull structure with surface bonded MFC actuators

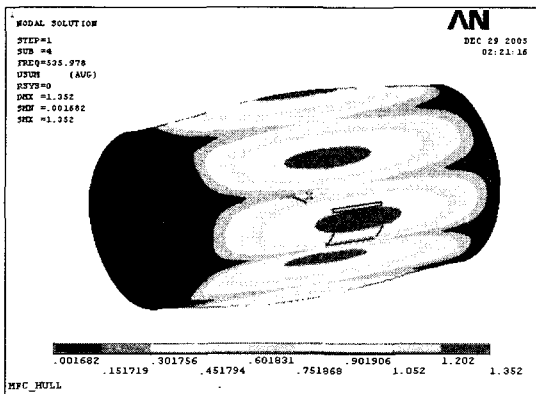
이다.  $\hat{M}$ ,  $\hat{C}$ ,  $\hat{K}$ 는 각각 모달 질량행렬, 모달 댐핑행렬, 모달 강성행렬이다.

시스템의 동적 특성을 파악하기 위하여 제안된 스마트 hull 구조물의 고유진동수와 모드 형상을 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS를 사용하여 구하였다. 스마트 hull 구조물의 기본적인 모드 형상을 Fig. 11에 나타내었다. 최대 변형은 MFC 작동기가 부착된 곳에서 일어났다. 이것은 고려된 형상에서 최고의 진동 억제 성능을 얻을 수 있다는 것을 뜻하는 것이다. MFC 작동기가 부착되지 않은 hull 구조물의 모드 형상도 Fig. 11과 동일하다. MFC 작동기의 유무에 따른 hull 구조물의 고유진동수를 Table 2에 비교하여 나타내었다. MFC 작동기의 부착에 따라 최대 5%의 고유진동수 감소가 나타났다. 이는 압전 재료의 높은 질량 밀도와 식 (3)에 나타난 바와

같이 압전 재료에 의한 연성 강성이 작아짐에 따라 발생한 것이다. 유한요소해석 결과의 타당성을 확인하기 위하여 알루미늄 구조물을 제작하고, 가속도 센서와 충격 해머를 사용하여 모드 실험을 수행하였다. 구조물의 길이방향으로 8개, 원주방향으로 5개의 지점을 선택하여 총 40개의 지점에서 측정하였으며, MFC 작동기의 유무에 따른 측정 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 구조물의 고유진동수가 MFC 작동기가 있는 경우 조금씩 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 ANSYS를 이용한 유한요소해석 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. 유한요소해석 결과와



(a) (3,1) mode



(b) (4,1) mode

Fig. 11 Fundamental mode shapes of hull structure with surface-bonded MFC actuators

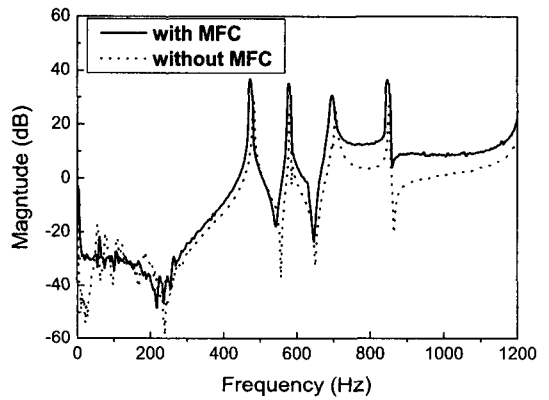


Fig. 12 Comparison of natural frequency with and without MFC actuators by experiment

Table 2 Natural frequencies of the end-capped hull structure with and without MFC actuator : FEA

Mode	w/o MFC [Hz]	with MFC [Hz]
(3, 1)	477	469
(4, 1)	541	535
(2, 1)	759	749
(5, 1)	787	781
(4, 2)	1,010	1,010

Table 3 Natural frequencies of the end-capped smart hull structure by FEA and experiment

Mode	FEA [Hz]	Experiment [Hz]
(3, 1)	469	474
(4, 1)	535	578
(2, 1)	749	696
(5, 1)	781	848
(4, 2)	1,010	1,006

실험 결과를 비교하여 Table 3에 나타내었으며, 최고 8%의 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 실험을 위해 제작한 hull 구조물의 end-cap을 설치하기 위한 플랜지를 유한요소 모델에서 고려하지 않았기 때문에 발생한 것이다.

이 연구에서는 효과적인 구조물의 진동 저감을 위하여 LQG 제어를 설계하였다. 일반적으로 LQR 제어 기법에서 가정하듯, 시스템의 모든 상태를 측정하는 것은 불가능하다. 만일 이것이 가능하다 할지라도, 측정값은 측정 소음에 의해 정확하지 않게 된다. 외란과 측정 잡음을 고려한 LQG 이론을 사용하여 상태공간 운동방정식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + w(t), \quad y(t) = Cx(t) + v(t) \quad (7)$$

여기서  $x(t)$ 는 상태 변수 벡터,  $u(t)$ 는 입력 벡터,  $y(t)$ 는 출력 벡터이고 A는 시스템 행렬, B는 입력 행렬, C는 출력 행렬이다. 외란  $w(t)$ 와 측정잡음  $v(t)$ 는 모두 변동없는 영평균을 가지는 Gaussian 백색 잡음으로 가정하고, 다음과 같은 공분산을 가진다.

$$\begin{aligned} E\{w(t)w^T(l)\} &= W\delta(l-t), \\ E\{v(t)v^T(l)\} &= V\delta(l-t), \quad E\{w(t)v^T(l)\} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $E[\cdot]$ 는 기대치,  $\delta$ 는 Kronecker delta 함수를 나타내며, W와 V는 외란과 측정 잡음의 세기를 나타내는 양한정 행렬이다.

LQG 제어기는 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - C\hat{x}(t)] \\ u(t) &= -K\hat{x}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $\hat{x}$ 은 예측된 상태를 나타내며, K는 제어 이득 행렬, L은 Kalman filter의 이득 행렬이다. 제어 입력은 다음과 같이 표현되는 성능 지수를 최소화하는 값으로 결정되게 된다.

$$J = \int_0^{t_f} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (10)$$

여기서 가중치 행렬 Q와 R은 양반한정이다. 최적 되먹임 제어 이득 행렬 K와 Kalman filter 이득 행

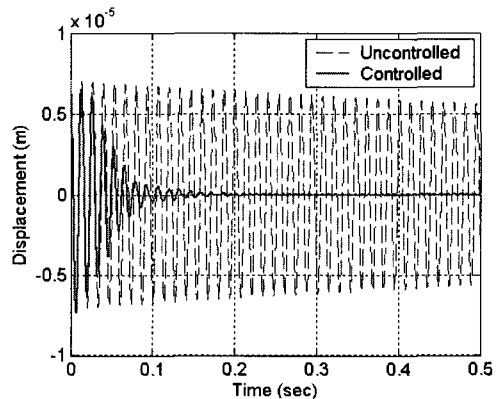
렬 L은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} K &= (R + B^T P B) B^T P A \\ L &= A \Sigma C^T (C \Sigma C^T + V)^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

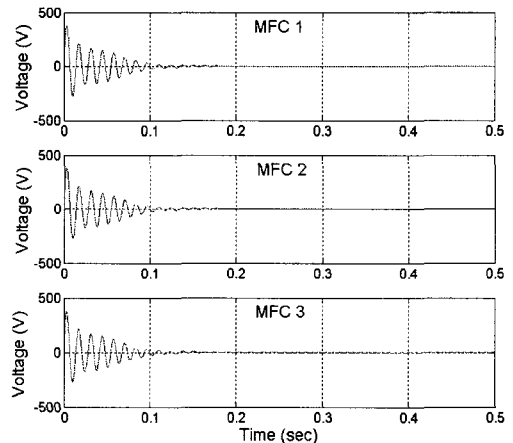
여기서 P와 S는 다음과 같은 Riccati 방정식의 양한정 해이다.

$$\begin{aligned} A^T P A - P - A^T P B (R + B^T P B)^{-1} B^T P A + Q &= 0 \\ A \Sigma A^T - \Sigma - A \Sigma C^T (C \Sigma C^T + V)^{-1} C \Sigma C^T + W &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

LQG제어기를 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 식 (9)에서의 가중치 행렬의 값은  $diag(Q) = 3 \times 10^6$ ,  $diag(R) = 1$ 로 설정하였다. 또한 모든 모드에



(a) Transient responses



(b) Input voltage history

Fig. 13 Simulation results of transient responses and corresponding input voltage history

에 대해서 0.2%의 비례 댐핑을 가정하였다. 이 연구에서는 기본적인 3개의 모드만 고려하였다. 초기 조건 (3,1) 모드의 과도 응답에 대한 결과를 Fig. 13(a)에 나타내었다. LQG 제어기의 적절한 가중치를 선정함으로써 우수한 진동 저감 효과를 얻을 수 있었다. 시뮬레이션에서 각 작동기에 인가된 제어 입력 전압을 Fig. 13(b)에 나타내었다. 각 MFC 작동기가 부착된 위치에서 최대 변형이 발생하였으므로, 세 작동기에 같은 크기의 제어 입력이 인가된 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

복합재 형태의 압전 작동기인 MFC 작동기의 특성을 파악하고, 구조물의 진동 저감 성능을 확인하였다. 압전 세라믹과 MFC 작동기를 간단한 빔 구조물과 평판 구조물에 적용하여 특성을 파악하였다. 유한요소 모델을 사용하여 제안된 스마트 hull 구조물의 운동방정식을 도출하고, 상용 해석 프로그램을 사용하여 모드 해석을 수행하여 구조물의 동적 특성을 파악하였다. 모드 실험을 통하여 해석 결과를 검증하였으며, 구조물의 진동 저감을 위하여 LQG 제어 알고리즘을 적용하여, 효과적으로 구조물의 진동을 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. MFC 작동기의 특성을 고려한 작동기의 부착 위치와 방향에 따른 진동 제어 성능 변화에 대한 연구와 함께 강건 제어 알고리즘을 적용한 제어 성능에 대한 연구가 계속될 예정이다.

#### 후 기

이 연구는 국방부가 지정한 UVRC(수중운동체특화센터)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

(1) Gandhi, M. V. and Thompson, B. S. 1992, *Smart Materials and Structures*, Chapman & Hall, New York.  
 (2) Brian Culshaw, 1996, *Smart Structures and Materials*, Artech House, Boston.

(3) Chopra, I., 2002, "Review of State-of-Art of Smart Structures and Integrated Systems", *AIAA Journal*, Vol. 40, pp. 2145~2187.

(4) Crawley, E. F. and de Luis, J., 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures", *AIAA Journal*, Vol. 25, pp. 1373~1385.

(5) Shin, H. C. and Choi, S. B., 1996, "Vibration Control of a Very Flexible Robot Arm via Piezoactuators", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 187~196.

(6) Kwak, M. K., 1995, "Active Vibration Control of Smart Structures Using Piezoelectric Materials", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 292~302.

(7) Kim, H. S., 2005, "Smart Structures Featuring Piezoelectric Materials: State of the Art", *Journal of KSNVE*, Vol. 15, No.1, pp. 33~42.

(8) Lee, I., 2001, "Research and Development on Applications of Piezoelectric Materials", *Journal of KSCM*, Vol. 14, No. 3, pp. 90~98.

(9) Qui, J. and Tani, J., 1995, "Vibration Control of a Cylindrical Shell Using Distributed Piezoelectric Sensors and Actuators", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6, pp. 474~481.

(10) Sohn, J. W., Kim, H. S. and Choi, S. B., 2006, "Active Vibration Control of Smart Hull Structures Using Piezoelectric Actuators", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers : Part C-Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 220, No. 9, pp. 1329~1338.

(11) Bent, A. A. and Hagood, N. W., 1995, "Anisotropic Actuation with Piezoelectric Fiber Composites", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6, No. 3, pp. 338~349.

(12) Bent, A. A. and Hagood, N. W., 1997, "Piezoelectric Fiber Composites", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 8, No. 11, pp. 903~919.

(13) Wilkie, W. K., Bryant, R. G., High, J. W., Fox, R. L., Hellbaum, R. F., Jalink, A., Little, B. D. and Mirick, P. H., 2000, "Low-cost Piezocomposite



Actuator for Structural Control Applications”, Proceedings of Seventh SPIE International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach, CA, pp. 329~334.

(14) Wilkie, W., High, J. and Bockman, J., 2002, “Reliability Testing of NASA Piezocomposite Actuators”, ACTUATOR 2002, pp. 270~273.

(15) Williams, R. B., Schultz, M. R., Hyer, M. W., Inman, D. J. and Wilkie, W. K., 2004, “Nonlinear Tensile and Shear Behavior of Macro Fiber Composite Actuators”, Journal of Composite Materials,

Vol. 38, No. 10, pp. 855~870.

(16) Sodano, H. A., Park, G. and Inman, D. J., 2004, “An Investigation into the Performance of Macro-fiber Composites for Sensing and Structural Vibration Applications”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 18, pp. 683~697.

(17) Sohn, J. W., Kim, H. S. and Choi, S. B., 2006, “Dynamic Modeling and Vibration Control of Smart Hull Structure”, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 840~847.